

크로바 스위치를 적용한 10/350 임펄스 회로에서 인덕턴스에 따른 wave tail 특성

조성철*, 이태형*, 김기복**, 엄주홍*
기초전력연구원*, 인하대학교**

Characteristic of Wave Tail According to Inductance values in 10/350 Impulse Circuit with Crowbar Switch

Sung-Chul Cho*, Tae-Hyung Lee*, Ki-Bok Kim**, Ju-Hong Eom*
Korea Electrical Engineering & Science Research Institute*, Inha University**

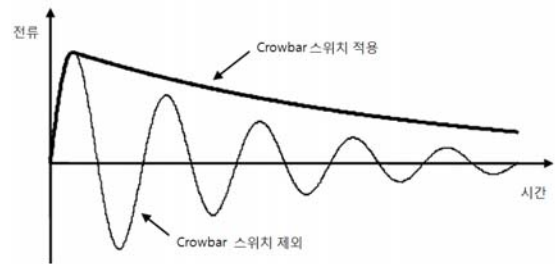
Abstract - This paper shows the characteristic of wave tail according to inductance values in 10/350 μs impulse circuit with crowbar switch. The PSpice was used to simulate the 10/350 μs current waveform and lightning current impulse generator was used to generate real current waveform. As a capacitor of condenser bank increases, a virtual front time increases and a time to half-value decreases. To get a perfect 10/350 μs current waveform, we should consider the combination of circuit values of the inductance, capacitance, time difference between trigger pulses and charged voltage of capacitor bank.

$$\tau = \frac{L_{ext} + L_{load} + L_{crowbar}}{R_{ext} + R_{load} + R_{crowbar}} \quad (1)$$

$L_{crowbar}$ 와 $R_{crowbar}$ 는 각각 크로바 부분의 자기 인덕턴스와 저항이다. $S_{crowbar}$ 가 동작한 이후의 전류는 식 (2)와 같이 지수함수적으로 감소하는 형태로 변한다.

$$i = i_{max} \cdot e^{-t/\tau} \quad (2)$$

그림 1에서 스위치 S와 $S_{crowbar}$ 의 동작에 의해 발생하는 전류 파형을 그림 2에 나타내었다. 크로바 스위치가 동작하지 않은 상태에서 발생하는 진동성 전류 파형의 첫 번째 피크에서 크로바 스위치가 동작하여 식 (2)와 같이 지수함수적으로 감소하는 전류파형이 합쳐져 10/350 파형이 만들어진다.



<그림 2> 크로바 스위치를 이용한 10/350 전류파형

1. 서 론

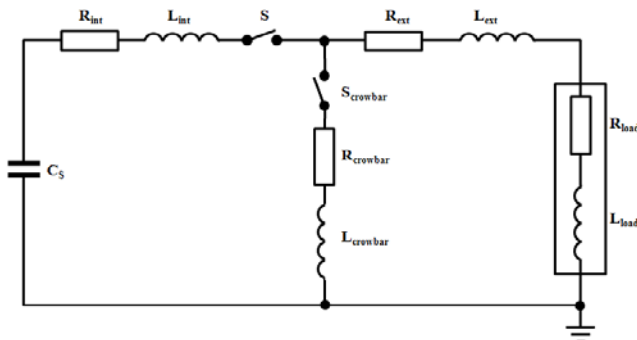
최근 낙뢰 중에 최초 단시간 뇌격전류에 대한 규정이 저전압 배전시스템용 SPD 시험규격인 IEC 61643-1과 피뢰 시스템 규격인 IEC 62305에 제시되면서 10/350 뇌격전류에 대한 관심이 높아지고 있다[1][2]. 유럽에서는 IEC 62305가 제정되기 이전에 10/350 전류파형 발생기에 대한 연구를 시작하였으며 현재는 세계 제일의 기술력을 확보한 상태이다. 국내의 시험규격과 피뢰규격에 IEC 규격을 도입함으로써 10/350 전류발생장치에 대한 필요성이 제기되고 있지만, 현재 우리나라에서는 10/350 전류파형 발생기를 전적으로 해외에서 수입하는 실정이다. 또한 관련 기술도 초기 시작단계로 생소한 분야로, 특히 대전류 임펄스를 대상으로 크로바 스위치를 이용한 전류파형 생성기술은 매우 부족하여 기초연구가 필요한 상태이다.

본 논문에서는 크로바 스위치를 이용한 10/350 전류파형을 발생시키기 위한 회로모델링과 실험을 통해 얻어진 전류파형을 분석하였다.

2. 본 론

2.1 원리

10/350 전류파형을 얻기 위한 가장 효과적인 방법은 RLC회로에서 크로바 스위치를 이용하는 것이다[3][4][5]. 그림 1은 크로바 스위치를 이용한 기본 회로를 나타내고 있다. 기존의 임펄스 전류발생기의 회로에 크로바 스위치가 들어간 회로가 추가 되었다.



<그림 1> 크로바 스위치를 이용한 10/350 전류파형 발생기 회로도

그림 1에서 t=0일 때 갭 S에 의해 방전이 시작되며, 이때 크로바 스위치 $S_{crowbar}$ 는 열린 상태이다. 전류의 피크값에서 크로바 스위치가 동작하면서 콘덴서 뱅크에 저장되었던 대부분의 에너지가 L_{ext} 와 L_{load} 로 전환된다. t=10 μs 일 때 크로바 스위치가 동작하여 콘덴서가 쇼트되면서 전류가 오실레이션되는 파형에서 식 (1)의 감쇠시정수를 갖는 지수함수적으로 감소하는 파형으로 전환된다. 파미시간 350 μs는 회로내의 인덕턴스와 저항에 의한 감쇠시정수에 의해서 결정된다[6].

2.2 실험계 구성

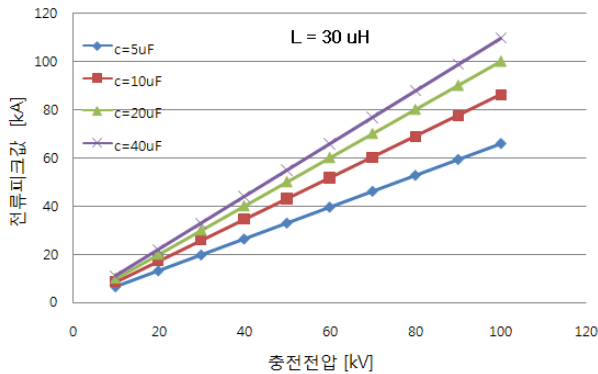
10/350 전류파형발생기를 제작하기 위해서 회로정수를 PSpice로 시뮬레이션하였다. 인덕터의 인덕턴스와 저항값의 변화에 따른 콘덴서 용량, 충전전압 그리고 표유저항의 값을 변화시키면서 10/350 전류파형을 만족하는 회로정수를 구하였다. 시뮬레이션으로 얻어진 10/350 전류파형을 만족하는 인덕턴스값을 얻기 위해 턴 수를 변화시킬 수 있는 인덕터를 제작하였다. 지름은 0.3 m이며, 14 mm의 구리도선을 이용하여 턴 수에 따라 연결할 수 있도록 하여 시뮬레이션된 인덕턴스값을 쉽게 얻을 수 있게 하였다. 10/350 전류파형 발생기는 제작된 인덕터, 크로바 스위치를 동작시키기 위한 임펄스전압발생기 그리고 임펄스전류발생기로 구성된다. PSpice에서 부하부분을 쇼트상태로 놓고 시뮬레이션을 하였기 때문에 실제 실험에서도 쇼트상태로 실험조건을 동일하게 하였다. PSpice에서 설정된 회로정수값은 $R_{load} = 0.001 \Omega$, $L_{load} = 0.1 \mu H$, $R_{crowbar} = 0.001 \Omega$, $L_{crowbar} = 0.1 \mu H$ 이다.

2.3 실험결과

그림 1의 회로를 PSpice를 이용하여 콘덴서의 용량과 인덕터의 인덕턴스에 따라 콘덴서의 충전전압을 변화시키면서 시뮬레이션을 하였다. 인덕터의 인덕턴스와 저항값은 수식에 의한 고정값으로 변동하면서 부하 저항값을 변화시켜가면서 10/350 전류파형을 만족하는 인가전압과 전류피크값을 찾았다. 인덕턴스가 11 μH, 30 μH, 50 μH인 경우의 추가 저항값은 각각 0.007 Ω, 0.04 Ω, 0.075 Ω이다.

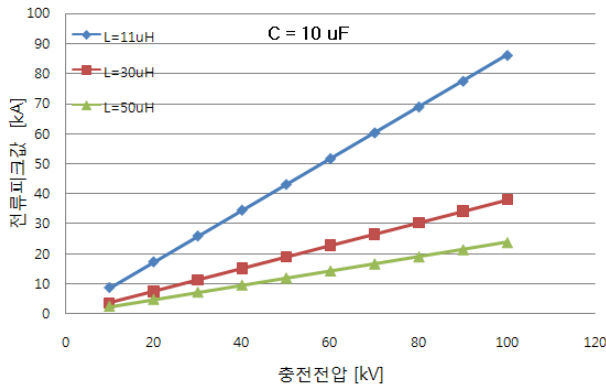
그림 3은 인덕턴스가 30 μH일 때 콘덴서의 용량에 따른 충전전압과 전류피크값을 보여준다. 충전전압이 증가할수록 전류는 증가하며, 콘덴서의 용량이 클수록 전류가 증가하는 기울기가 크다. 또한 충전전압이 높을수록 콘덴서의 용량이 전류피크값에 미치는 영향이 더 크지만, 콘덴서의 용량과 전류피크값이 같은 비율로 증가하지는 않았다. 이는 상승시간 10 μs를 만족하기위해 S가 동작하고 크로바 스위치가 10 μs의 시간 이후에 동작하기 때문에 진동하는 전류파형의 피크값에 도달하기 이전에 크로바 스위치가 동작하기 때문이다. 80 kA의 전류피크값을 얻고자

할 때 캐패시터 40 μF 와 충전전압 70 kV보다는 캐패시터 10 μF 와 충전전압 90 kV를 이용하는 것이 더 효율적이다.



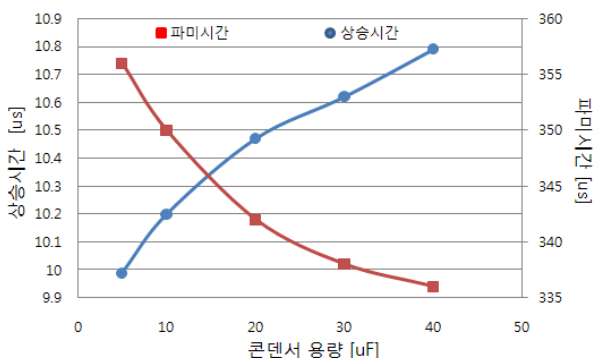
〈그림 3〉 콘덴서 용량에 따른 충전전압과 전류피크값

실험에 적용될 임펄스전류발생기의 콘덴서 용량인 10 μF 을 PSpice에서 적용하여 인덕턴스 변화에 따른 충전전압과 전류피크값을 구하였다. 그림 4는 콘덴서 용량이 10 μF 일 때 인덕턴스의 변화에 따른 충전전압과 전류피크값을 보여준다. 충전전압이 증가함에 따라 전류피크값은 증가하며, 인덕턴스값이 작을수록 전류가 증가하는 비율이 높다. 인덕턴스는 전류피크값에 직접적인 영향을 주기 때문에 인덕턴스가 크면 높은 전류피크값을 얻기가 힘들다.



〈그림 4〉 인덕턴스에 따른 충전전압과 전류피크값

크로바 스위치가 10 μs 의 일정한 시간에 동작하여도 회로정수의 변화에 의해서 상승시간과 파미시간이 달라진다. 그림 5는 30 μH 의 인덕턴스인 경우 콘덴서의 용량에 따른 상승시간과 파미시간을 나타내었다. 콘덴서 용량이 증가할수록 상승시간은 증가하고 파미시간은 감소하는 경향을 나타낸다. 콘덴서의 용량이 증가함에 따라 크로바 인덕턴스에 의한 영향으로 오실레이션 되는 전류피크값이 높아져 상승시간이 증가하게 된다. 또한 증가한 전류피크값에 의해서 전류피크값의 50%가 되는 지점까지의 시간도 줄어들게 되어 파미시간이 감소하게 된다.

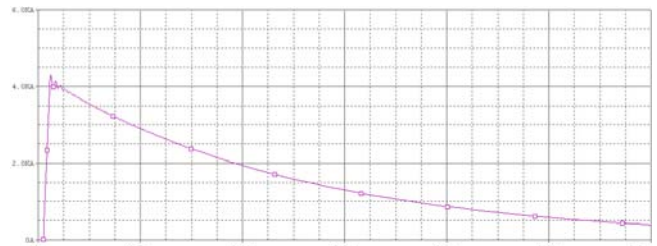


〈그림 5〉 콘덴서 용량에 따른 상승시간과 파미시간

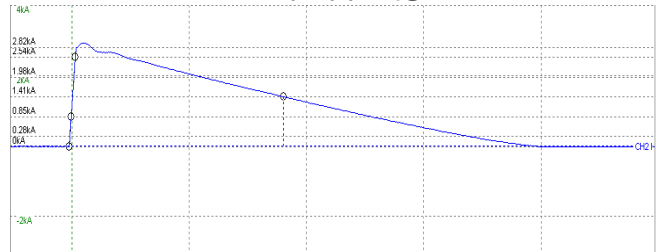
실험에 사용될 인덕터를 제작하기 위해서 인덕턴스 30 μH 와 일치되는 인덕터를 제작했다. 인덕터의 턴 수를 4로 했을 때 인덕턴스와 저항은 수식을 통하여 각각 35.5 μH , 4.67 Ω 로 시뮬레이션에 적용된 값과 비슷하였다. 구해진 회로정수값을 이용하여 PSpice로 시뮬레이션을 했을 때 콘덴서의 충전전압에 따라 전류피크값이 증가하는 것을 확인하였으며,

이 때 상승시간, 파미시간은 변하지 않았다. 이것은 콘덴서의 충전전압을 조정하여 원하는 10/350 전류피크값을 얻을 수 있는 것을 의미한다. 하지만 실제 뇌격전류발생기를 통해서 실험한 결과, 시뮬레이션 결과와 많은 차이가 발생하였다. 10/350 전류파형을 얻기 위해 인덕터의 인덕턴스값과 충전전압을 변화시켜가면서 반복실험하여 그림 6(b)과 같은 파형을 얻었다.

그림 6은 크로바 스위치를 적용하여 시뮬레이션과 실험을 통해 얻어진 최종 10/350 전류파형을 보여준다. 시뮬레이션된 파형은 10 μs 의 상승시간, 351 μs 의 파미시간 그리고 4.3 kA의 전류 피크값을 보였다. 하지만 실제 만들어진 파형의 파라미터는 12.4 μs 의 상승시간, 366 μs 의 파미시간 그리고 2.8 kA의 전류피크값을 보였다. 가장 큰 차이를 보인 것은 전류 피크값으로 시뮬레이션을 통해서 얻어진 전류피크값보다 약 65% 정도 감소하였다. 측정된 전류파형이 시뮬레이션 파형처럼 지수함수적으로 감소해야하지만 전류파형이 직선에 가까운 형태로 감소하는 특성을 보였다. 이는 전류가 감소함에 따라 구성하고 있는 회로정수에 영향을 주어 초기 감쇠지수수에 변화를 준 것으로 판단된다.



(a) 시뮬레이션 파형



(b) 측정 파형

〈그림 6〉 크로바 스위치를 이용한 10/350 μs 전류파형

3. 결 론

본 논문은 크로바 스위치를 적용한 10/350 임펄스 회로에서 인덕턴스에 따른 전류파형의 파미 특성을 나타내었다. PSpice를 이용하여 시뮬레이션한 결과, 크로바 스위치가 적용되는 회로내의 회로정수가 결정이 되면 콘덴서의 충전전압으로 원하는 전류피크값을 얻을 수 있다. 전류파형의 파미시간은 콘덴서의 충전전압이 증가할수록 감소하고 상승시간은 증가하였다. 시뮬레이션을 통해 얻어진 회로정수로 실험을 했을 때 시뮬레이션 결과와 다르며, 인덕턴스와 충전전압에 따라 파미시간의 변화가 커져 원하는 전류피크값에 해당하는 10/350 전류파형을 얻기 힘들었다. 시뮬레이션과 실제 실험의 결과에 차이가 발생하기 때문에 앞으로 지속적인 실험을 통하여 적절한 회로정수값을 찾을 계획이다.

본 연구는 지식경제부 지원에 의하여 기초전력연구원 주관으로 수행된 과제임.

[참 고 문 헌]

- [1] IEC 61643-1, Low-voltage surge protective devices, 2005.
- [2] IEC 62305, Protection against lightning, 2006.
- [3] Dipl.-Ing.Christof Drilling, A New Generator for Testing of SPD's Using Multiple Lightning Current Impulses for Combined Tests with Follow Currents, BET Blitzschutz and EMV Technologiezentrum GmbH, Germany.
- [4] Jan Meppelink, Triggered graphite spark gaps using build in battery driven high voltage impulse amplifiers with an opto electronic input, ICPPA, 2001.
- [5] Michael Gamlin, Impulse Current Testing, Lightning Protection Forum, 2004.
- [6] F.Heidler, W. Zischank, Lightning Protection Standards and Testing, ICLP, 2008.